

Studi Eksperimen Unjuk Kerja Mesin Diesel Menggunakan Sistem Dual Fuel Solar-Gas CNG dengan Variasi Tekanan Injeksi Gas dan Derajat Waktu Injeksi

Dicky Yoko Exoryanto dan Bambang Sudarmanta

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: sudarmanta@me.its.ac.id

Abstrak—Bahan bakar gas ini jika ditinjau dari ekonomis tergolong sangat murah dan ramah lingkungan. Namun, pengaplikasian bahan bakar gas CNG pada generator diesel dengan sistem dual fuel berdampak pada penurunan performansinya. Hal ini terjadi karena rasio campuran udara dan bahan bakar pada sistem dual fuel belum sesuai, sehingga perlunya penelitian lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa pada mesin diesel dengan memodifikasi saluran masuk udara dengan memasang injector gas CNG untuk memasukkan bahan bakar tersebut kedalam ruang bakar sehingga mesin diesel berubah menjadi sistem dual fuel. Tidak hanya saluran masuk udara saja yang di modifikasi tetapi, variasi start of injection dan tekanan gas yang masuk juga di variasikan.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan menginjeksikan gas CNG ke dalam ruang bakar melalui saluran hisap yang sudah terpasang injector. Proses pengaturan injeksi gas CNG diatur oleh ECU programable melalui software VEMSTUNE. Sistem pengaturan yang dilakukan adalah mengatur derajat waktu injection (SOI) dengan nilai 5°, 30°, 55°, dan 80° CA BTDC dan variasi tekanan masuk gas CNG dengan nilai 1, 1,5, 2, dan 2,5 N/m². Penelitian ini dilakukan dengan putaran mesin konstan sebesar 2000 rpm dengan beban 0 sampai 100 %. Hasil yang didapatkan dari eksperimen yang dilakukan kali ini, antara lain : performa dual fuel lebih optimal dibandingkan saat pengoperasian single fuel. Pengaturan paling optimal terjadi pada start of injection 80° CA BTDC dengan tekanan 1,5 gas CNG. Gas CNG dapat menggantikan porsi bahan bakar minyak solar sebesar 45,30 %. Nilai substitusi minyak solar yang optimal sebesar 61,39 % dan SFC minyak solar rata-rata mengalami penurunan sebesar 47,10 %, tetapi SFC dual fuel rata-rata meningkat sebesar 47,67 % dibandingkan SFC single fuel. Nilai rata-rata efisiensi thermal turun sebesar 40,89 %, nilai AFR rata-rata turun dari 25,60 $\frac{\text{kg/s}}{\text{kg/s}}$ menjadi 12,90 $\frac{\text{kg/s}}{\text{kg/s}}$ dan Temperatur gas buang meningkat dari 292°C menjadi 317°C.

Kata Kunci—Dual fuel, Start of injection, gas CNG.

I. PENDAHULUAN

Bahan bakar fosil merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbarui. Bahan bakar fosil ini keberadaannya sangat penting bagi kehidupan umat manusia seperti kebanyakan proses industri, transportasi, dan kebutuhan rumah tangga. Harga rata-rata minyak mentah Indonesia pada tahun 2014 berdasarkan perhitungan Formula ICP mencapai USD108,95 per barel

atau naik USD2,75 per barel dari bulan Mei 2014 yang mencapai USD106,20 per barel.

CNG merupakan teknologi lama yang sekarang menjadi perhatian sebagai bahan bakar alternatif untuk menggantikan bahan bakar konvensional saat ini. CNG adalah gas mudah terbakar (*flammable*) yang dihasilkan dari pengekstrakan gas alam yang digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang dapat diperbarui. Gas CNG sekarang lebih banyak di gunakan oleh kendaraan – kendaraan kecil maupun besar karena hasil pembakaran yang di hasilkan ramah lingkungan. Sehingga kendaraan-kendaraan yang awalnya menggunakan bahan bakar bensin maupun solar, beralih ke bahan bakar gas CNG.

Berdasarkan penelitian yang di lakukan [1], sistem *dual fuel* pada penelitian ini menggunakan minyak solar dan biogas hasil gasifikasi dari kotoran sapi dengan metode pemasukan biogas dengan menggunakan *mixer venturi*. Pada penelitian ini sistem pasokan udara sudah menggunakan *blower* untuk mengatasi jumlah udara yang berkurang akibat diaplikasikannya gas pada saluran hisap, hanya saja penggunaan *blower* belum cukup untuk memenuhi jumlah udara yang dibutuhkan karena faktor kebutuhan tekanan udara yang masuk ke ruang bakar yang tinggi saat semakin banyaknya gas yang masuk ke saluran hisap. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian sistem *dual fuel* yaitu AFR berkisar antara 9 hingga 19 dan solar yang tersubstitusi mencapai 76,21%.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Bahan Bakar Solar

Bahan bakar dalam aplikasi mesin pembakaran memiliki 3 (tiga) jenis bentuk fisik. Tapi untuk mesin pembakaran dalam, khususnya mesin diesel bentuk fisik bahan bakar hanya ada dalam dua bentuk fisik, yaitu cair dan gas. Meskipun ada yang dikatakan berasal dari bahan bakar padat, tapi dengan melalui proses gasifikasi dapat dihasilkan bahan bakar dalam wujud gas [2]. Mesin diesel adalah mesin yang menggunakan bahan bakar *fossil diesel* yang di peroleh dari destilasi pendidihan minyak mentah (*crude oil*) pada suhu 250 °C sampai 370 °C. Hidrokarbon yang terdapat didalamnya terdiri dari *parafin*, *naphtalene*, *olefin* dan *aromatik* dengan jumlah karbon yang bervariasi 12 sampai 18. Bahan bakar *fossil diesel* diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu *fossil diesel-1D*, yaitu bahan bakar untuk daerah beriklim dingin, *fossil diesel-2D*, yaitu bahan bakar untuk mesin

diesel otomotif dan stasioner putaran menengah keatas serta *fossil diesel-4D*, yaitu bahan bakar untuk mesin diesel stasioner putaran rendah. Bahan bakar fossil diesel-2D dikenal dengan istilah HSD (*High Speed Diesel*) [2]. Dibawah ini adalah tabel properties bahan bakar solar.

TABEL 1. PROPERTIES BAHAN BAKAR SOLAR [3]

No.	Properties	Unit	Limit	
			Min	Max
1.	Density pada 15 °C	kg/m ³	815	870
2.	Angka Cetane	-	45	-
3.	Index Cetane	-	48	-
4.	Visc. Kinematik pada 40 °C	mm ² /sec	2.0	5.0
5.	Titik Didih	°C	-	18
6.	Titik Nyala	°C	60	-
7.	Distilasi: T95	°C	-	370
8.	Kandungan Belerang	% massa	-	0.35
9.	Korosi Copper	merit	-	No. 1
10.	Residue Konradson Carbon	merit	-	No. 1
11.	Kandungan Abu	% m/m	-	0.01
12.	Kandungan Air	Mg/kg	-	500
13.	Partikulat	Mg/l	-	0.01
14.	Angka Asam Kuat	mgKOH/g	-	-
15.	Total Asam Kuat	mgKOH/g	-	0.6
16.	Warna	No. ASTM	-	3.0
17.	API Gravity pada 15 °C	-	-	-

B. Bahan Bakar Gas CNG

Bahan bakar gas yang digunakan adalah *compressed natural gas* (CNG), dimana sebagian besar unsur kimianya terdiri dari methane (CH₄) dan sisanya berupa methane, propane, butane, pentane, dan carbon monoxide. Komposisi dan karakteristik dari gas akan sangat bervariasi dari satu sumber dengan sumber lainnya, dimana hal ini mempengaruhi kondisi stoikiometrinya. Compressed natural gas memiliki beberapa kekurangan, yakni fasenya dalam temperatur ruangan sehingga akan menyulitkan dalam hal penyimpanan dan mobilitas. Selain itu, natural gas memiliki energi persatuan volume (energy density) yang lebih kecil dibandingkan solar, methanol, gasoline, atau bahan bakar hidrokarbon cair lainnya.

Gas alam terkompresi (compressed natural gas) adalah alternatif bahan bakar selain bensin atau solar. Di Indonesia, kita mengenal gas CNG sebagai bahan bakar gas (BBG). Bahan bakar ini lebih bersih bila dibandingkan dengan bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. Gas CNG dibuat dengan melakukan kompresi methane (CH₄) yang diekstrak dari gas alam.

Gas CNG merupakan gas alam yang mengalami kompresi agar dapat digunakan sebagai bahan bakar pada kendaraan. Komposisi kimia dan dari gas CNG dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

TABEL 2. KOMPOSISI KIMIA GAS CNG [4].

Komposisi kimia	Mol (%)
Methana (CH ₄)	96.7251
Ethana (C ₂ H ₆)	0.9602
Propane (C ₃ H ₈)	0.5253
<i>i</i> -Butane (<i>i</i> -C ₄ H ₁₀)	0.0.980
<i>n</i> - Butane (<i>n</i> -C ₄ H ₁₀)	0.1130
<i>i</i> -Pentane (<i>i</i> -C ₅ H ₁₂)	0.0425
<i>n</i> -Pentane (<i>n</i> -C ₅ H ₁₂)	0.0295

Carbon diiodida (CO ₂)Nitrogen (N ₂)	0.0815
Hexanes Plus (C ₆ +))	0.6573
Hidrogen Sulphide (H ₂ S)	0.0543
Oxygen	0
Carbon monoxide	0
	0.7708
Total	100

Sumber: PT. Pgas Solution, Wilayah Surabaya

C. Prinsip Kerja Motor Diesel Empat Langkah

Pada motor diesel empat langkah, satu siklus kerja diselesaikan dalam empat gerakan piston atau dua putaran dari *crankshaft*. Setiap langkah menempuh 180° sehingga dalam satu siklus menempuh 720° putaran *crankshaft*. Berikut ini merupakan prinsip kerja motor diesel empat langkah.

1) Langkah Isap

Berawal dari posisi piston yang berada pada TMA, *piston* akan bergerak turun dan meningkatkan *volume* silinder. Pada waktu yang bersamaan katup masuk (*inlet valve*) terbuka sehingga udara masuk ke dalam silinder. Ketika *piston* berada pada titik mati bawah (TMB), *volume* silinder berada pada kondisi maksimum, yaitu *volume piston* ditambah *volume* kompresi.

2) Langkah Kompresi

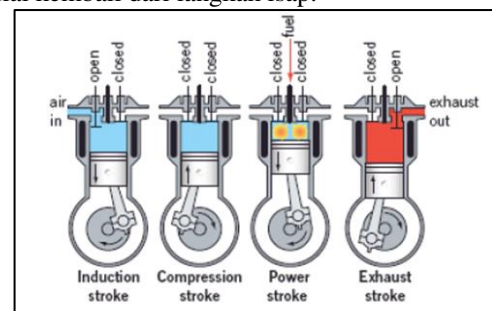
Pada langkah ini, katup masuk dan katup buang (*exhaust valve*) tertutup. Piston bergerak naik dan mengompresi udara yang telah masuk ke dalam silinder hingga mencapai rasio kompresi mesin. Dalam proses ini, temperatur udara akan meningkat mencapai 900°C. Ketika langkah kompresi telah selesai, bahan bakar diinjeksikan pada tekanan yang tinggi ke dalam udara terkompresi yang berada dalam temperatur yang tinggi. Ketika *piston* berada pada posisi TMA, *volume* silinder yang terbentuk merupakan *volume* kecil.

3) Langkah Usaha

Pada langkah ini, katup masuk dan buang masih tertutup. Pada akhir langkah kompresi pompa bahan bakar bertekanan tinggi menginjeksikan sejumlah bahan bakar dengan ketentuan sempurna ke dalam ruang bakar yang berisi udara panas yang dikompresikan. Bahan bakar terbagi sangat halus dan bercampur dengan udara panas. Karena 605system605ture udara yang tinggi maka bahan bakar langsung terbakar, akibatnya tekanan naik dan *piston* bergerak dari TMA ke TMB.

4) Langkah Buang

Sebelum *piston* berada pada TMB, katup buang terbuka. Panas dan gas hasil pembakaran keluar dari silinder dikarenakan karena adanya gaya yang timbul akibat gerakan *piston* naik kembali. Pada akhir langkah buang, *crankshaft* telah selesai melakukan dua kali putaran dan siklus dari mesin diesel empat langkah dimulai kembali dari langkah isap.



Gambar 1. Prinsip Kerja Motor Diesel Empat Langkah

D. Pengaruh *Start of Injection* terhadap Performa Mesin

Start of injection (awal injeksi) atau waktu injeksi adalah titik awal atau sudut saatpenyalan pembakaran pada mesin diesel dengan jalan menginjeksikan bahan bakar langsung ke dalam ruang bakar (*direct injection*) atau melalui *intake manifold* (*indirect injection*). *Start of injection* sangat menentukan proses pembakaran di dalam selinder sehingga akan mempengaruhi performa dan emisi gas buang yang dihasilkan oleh mesin diesel termasuk yang menggunakan *dual fuel*. Untuk itu, dibutuhkan sudut *start of injection* yang tepat dalam menginjeksikan bahan bakar kedalam ruang bakar agar didapatkan pembakaran yang sempurna sehingga dapat meningkatkan performa dan mengurangi emisi gas buang [5].

E. Pengaruh Durasi Injeksi terhadap Performa Mesin

Durasi injeksi (*duration of injection*) adalah suatu proses lamanya injektor menginjeksikan bahan bakar ke dalam ruang bakar pada setiap silinder. Lamanya durasi injeksi menentukan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan pada bahan bakar gas (CNG) yang mempunyai nilai *density* yang rendah, maka perlu dilakukan pengaturan durasi injeksi dari keadaan standarnya. Hal ini dapat meningkatkan performa mesin yang lebih optimal dibandingkan saat menggunakan pengaturan standar gas CNG.

III. METODE PENGUJIAN

A. Pengujian Single Fuel dengan Bahan Bakar Minyak Solar

Percobaan dilakukan dengan putaran mesin tetap (*stationary speed*) pada 2000 rpm dengan variasi beban listrik mulai dari 500 – 4000 Watt. Tahapannya adalah sebagai berikut:

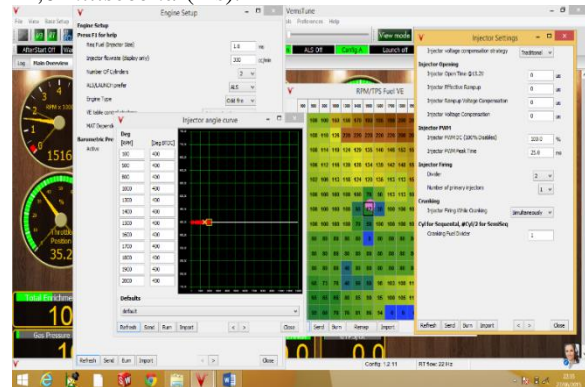
- Menghidupkan mesin diesel,
- Melakukan pemanasan mesin diesel ± 20 menit pada putaran mesin 2000 rpm hingga temperature mesin mencapai temperatur operasi,
- Mengatur pembebanan pada mesin diesel mulai 500 Watt.
- Sampai dengan 4000 Watt dengan interval kenaikan setiap 500 Watt dengan tetap menjaga putaran mesin sebesar 2000 rpm setiap pembebanan.
- Mencatat data-data yang dibutuhkan setiap kenaikan beban, seperti : waktu konsumsi solar setiap 25 ml, temperatur oli pelumas, air pendingin, mesin dan gas buang, ΔL manometer udara (untuk mengetahui *mass flowrate* kebutuhan udara), Tegangan listrik (V) dan arus listrik (I).
- Setelah pengambilan data selesai dilakukan, maka beban diturunkan secara bertahap hingga beban nol,
- Mesin dibiarkan dalam kondisi tanpa beban selama lebih kurang 5 menit,
- Mesin dimatikan dan ditunggu kembali dingin.

B. Pengujian dengan Bahan Bakar Kombinasi gas CNG Minyak Solar

Untuk pengujian dengan menggunakan bahan bakar *dual fuel*, putaran mesin juga tetap (*stationary speed*) pada 2000 rpm dan dengan variasi beban listrik mulai dari 500 Watt sampai 4000 Watt. *Start of injection* solar

yang digunakan sesuai dengan standar mesin yaitu 340° BTDC. Pada pengujian *dual fuel* perlu dilakukan pengaturan *start of injection* dan tekanan bahan bakar gas CNG terlebih dahulu. Adapun langkah pengujiannya sebagai berikut:

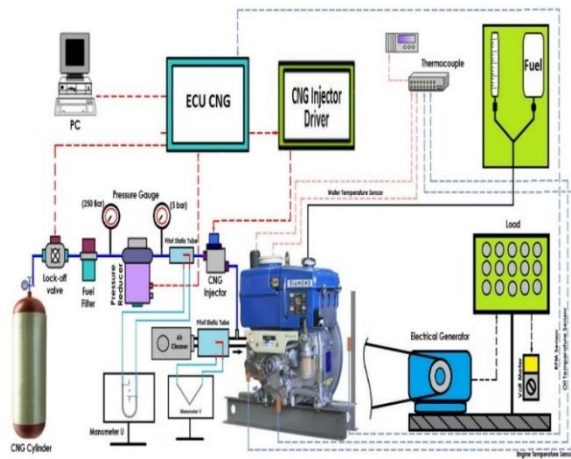
- Memastikan kembali kondisi kesiapan mesin diesel, pembebanan, kelistrikan, dan sistem penyuplai bahan bakarsolar dan gas CNG.
- Menghidupkan mesin diesel dengan menggunakan solar sebagai bahan bakar, tanpa memberikan beban dan membiarkannya hingga ± 20 menit.
- Mengatur tekanan gas CNG dengan cara mengatur tekanan keluar *pressure reducer* sebesar 1; 1,5; 2; dan 2,5 bar.
- Pengaturan *menu start of injection* berguna untuk mendapatkan derajat sudut awal injeksi bahan bakar gas CNG yang tepat pada setiap pembebanan mesin. Adapun besarnya variasi *start of injection* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 5°, 30°, 55° dan 80° *Before Top Dead Center* (BTDC).
- Pengaturan menu durasi injeksi berguna untuk mendapat derajat sudut durasi injeksi bahan bakar gas CNG yang tepat pada setiap pembebanan mesin. Adapun besarnya durasi injeksi yang digunakan pada penelitian ini adalah 11,6 *milisecond* (ms). Tetapi durasi injeksi tidak di variasikan, melainkan tetap 11,6 *milisecond* (ms).



Gambar 2. Contoh pengaturan mapping start of injection (SOI) dan durasi injeksi (DI) bahan bakar gas CNG

- Mengatur pembebanan pada mesin diesel mulai 500 Watt sampai dengan 4000 Watt dengan interval kenaikan setiap 500 Watt dengan tetap menjaga putaran mesin sebesar 2000 rpm setiap pembebanan.
- Mencatat data-data yang dibutuhkan setiap kenaikan beban, seperti waktu konsumsi solar setiap 25 ml, \dot{m}_{gasCNG} dan udara, temperatur (mesin, pelumas, air pendingin, gas buang), tegangan listrik (V) dan arus listrik (I).
- Setelah pengambilan data selesai dilakukan, kemudian beban listrik diturunkan secara bertahap sampai nol dan menonaktifkan sistem injeksi bahan bakar gas CNG yang masuk ke *intake manifold* sehingga tidak ada lagi suplai gas.
- Mesin dibiarkan dalam kondisi tanpa beban selama ± 5 menit.
- Mengulangi langkah a sampai i dengan variasi *start of injection*, tetapi durasi injeksi tetap.

Dibawah ini adalah skema pengujian yang dilakukan.



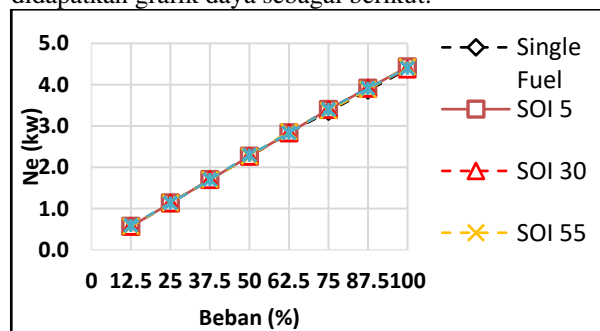
Gambar 3. Skema Pengujian

IV. HASIL DAN ANALISA

Pada eksperimen ini didapatkan hasil yang telah dihitung anatar lain :

A. Daya

Setelah dilakukan pengujian mesin diesel , maka didapatkan grafik daya sebagai berikut:



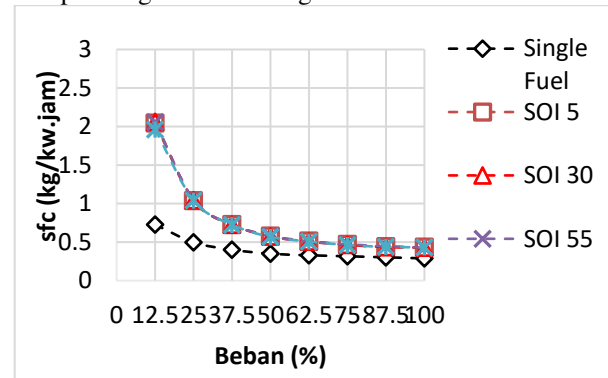
Gambar 4. Grafik Daya fungsi Beban dengan Tekanan 1,5 bar

Grafik 4 menunjukkan kenaikan dari beban 500 – 4000 watt. Seiring dengan penambahan beban, generator mengalami penurunan voltase dan putaran mesin diesel juga menurun. Untuk menjaga putaran mesin diesel agar tetap stabil maka throttle pada mesin diatur sehingga tuas throttle yang terhubung oleh governor memberikan pasokan solar untuk mengatasi beban lebih yang di terima dari generator. Sehingga putaran mesin kembali naik dan putaran generator juga naik.

Pada grafik di atas terlihat kecenderungan bahwa tidak ada perbedaan nilai daya yang dihasilkan antara pengoperasian *dual-fuel* dan *single-fuel*. Hal ini disebabkan oleh karena pada pengoperasian *dual-fuel*, udara dan gas CNG masuk kedalam ruang bakar secara bersamaan lalu campuran udara dan gas CNG yang masuk kedalam ruang bakar di kompresi sebelum titik mati atas (TMA) minyak solar di semprotkan untuk membantu prosesnya pembakaran. Karena nilai kalor gas CNG tinggi di bandingkan dengan nilai kalor minyak solar sehingga pembakaran yang terjadi pada ruang bakar tidak sempurna karena sebagian gas CNG terbakar dengan sendirinya. Putaran mesin tetap konstan dan tegangan listrik tetap stabil. Laju aliran massa bahan bakar gas CNG yang masuk divariasikan sebesar 1, 1,5, 2, dan 2,5 bar sesuai tekanan yang diatur melalui tekanan keluar pada *pressure reducer*.

B. SFC

Setelah dilakukan pengujian mesin diesel, maka didapatkan grafik Sfc sebagai berikut:



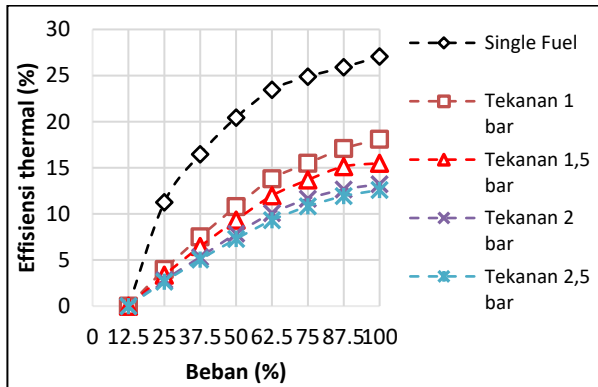
Gambar 5. Grafik Sfc Minyak Solar fungsi Beban dengan Tekanan 1,5 bar

Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai *SFC* semakin turun seiring dengan penambahan beban yang semakin tinggi, hal ini menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diterima mesin, bahan bakar yang diperlukan akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya beban listrik maka jumlah minyak solar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan lebih banyak untuk menjaga putaran mesin konstan, karena pada saat beban listrik ditambah maka beban putaran generator bertambah berat dan putaran mesin turun. Putaran tersebut dinaikkan kembali, dengan melakukan kontrol pada jumlah bahan bakar minyak solar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar melalui mekanisme pada pompa injeksi minyak solar yang diatur oleh governor. Setelah beban ditambah, grafik *SFC* cenderung mengalami penurunan sampai titik minimum di beban 4000 watt, kemudian nilai *SFC* mengalami peningkatan tetapi tidak begitu signifikan, hal ini terjadi karena campuran kaya yang menyebabkan banyak bahan bakar minyak solar yang tidak terbakar sempurna sehingga energi yang dikonversi menjadi daya menjadi kecil.

Jika dianalisa menurut nilai kalor persiklus maka nilai kalor yang dimiliki sistem *dual-fuel* lebih tinggi dibandingkan dengan sistem *single-fuel* hal ini disebabkan oleh proses pelepasan kalor saat pembakaran kurang maksimal dikarenakan campuran bahan bakar dan udara lebih kaya. Kebutuhan energi dalam satu siklus sebagian sudah terpenuhi oleh kalor gas CNG sehingga hanya dibutuhkan sedikit dari kalor minyak solar, oleh karena itu, jumlah minyak solar yang digunakan menjadi berkurang. Dengan demikian nilai AFR juga menurun akan tetapi temperatur *Exhaust* menjadi tinggi karena kalor yang dihasilkan dari pembakaran tidak dapat terbangun secara maksimal. Dengan pengaturan tekanan gas CNG, maka besar energi yang masuk ke ruang bakar meningkat, dimana gas CNG memiliki nilai kalor bahan bakar yang lebih tinggi dibandingkan dengan minyak solar, yaitu: sebesar 47.141 kJ/kg, sedangkan nilai kalor minyak solar sebesar 43.979 kJ/kg. Untuk memproduksi energi dengan putaran stasioner 2000 rpm maka laju energi yang diperlukan dari minyak solar menjadi lebih sedikit.

C. Efisiensi Thermal

Setelah dilakukan pengujian mesin diesel , maka didapatkan grafik Efisiensi thermal sebagai berikut :



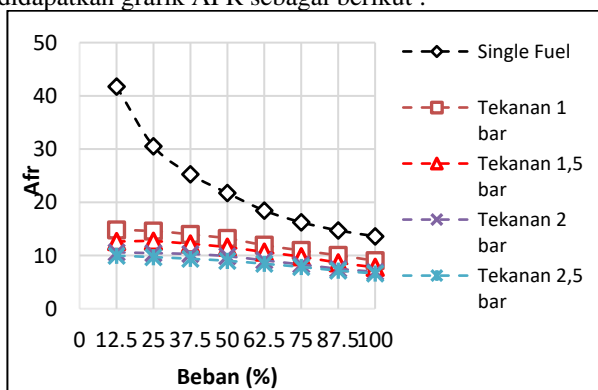
Gambar 6. Grafik Efisiensi thermal fungsi Beban dengan SOI 80°

Gambar 6 menunjukkan nilai efisiensi thermal fungsi beban pada tekanan 1, 1,5, 2, dan 2,5 bar. Dari gambar di atas terlihat bahwa efisiensi termal tertinggi ada pada penggunaan *single-fuel*, dan kemudian diikuti penurunan nilai efisiensi termal saat laju aliran massa gas CNG yang dioperasikan dengan variasi tekanan gas CNG dan start injeksi. Hal ini disebabkan karena pada *dual fuel*, besar energi input melalui bahan bakar yang masuk ke ruang bakar lebih besar untuk beban yang sama. Grafik juga menunjukkan bahwa efisiensi termal cenderung naik seiring bertambahnya beban sampai pada nilai maksimum, kemudian nilainya menurun.

Dapat dilihat bahwa ada hubungan antara *SFC* dengan nilai efisiensi termal yang dihasilkan. Saat *SFC* turun hingga nilai terendah maka efisiensi termal naik hingga bernilai maksimum, yang menggambarkan bahwa dengan naiknya efisiensi termal maka semakin banyak bahan bakar yang dapat dikonversi selama proses pembakaran menjadi daya yang dikeluarkan melalui poros mesin. Saat nilai *SFC* naik kembali maka nilai efisiensi termal turun yang mengindikasikan semakin banyak bahan bakar yang terbuang bersama gas sisa pembakaran karena tidak dapat dikonversi menjadi daya mesin pada saat proses pembakaran berlangsung di ruang bakar. Dari variasi tekanan gas CNG dan *start of injection* bahan bakar gas CNG menunjukkan efisiensi *thermal* (η_{th}) terbaik terjadi pada tekanan gas 1 bar dengan *start of injection* 80° CA BTDC. Dimana nilai rata-rata penurunan efisiensi *thermal* (η_{th}) sebesar 40,89 % terhadap kondisi *single fuel*.

D. AFR

Setelah dilakukan pengujian mesin diesel, maka didapatkan grafik AFR sebagai berikut :



Gambar 7. Grafik AFR fungsi Beban dengan SOI_{gas CNG} 80°

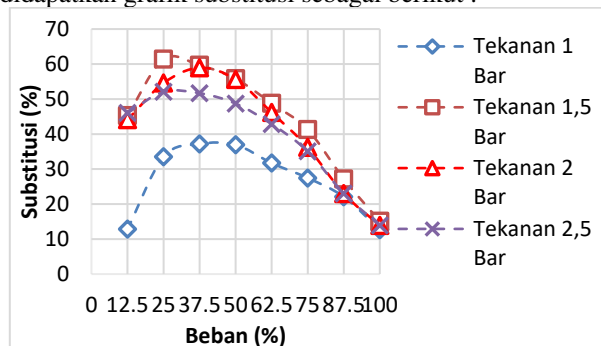
Gambar 7 menunjukkan perbedaan yang sangat besar antara AFR *single fuel* dengan *dual fuel*. Hal ini disebabkan jumlah bahan bakar yang masuk dalam

sistem *dual fuel* jauh lebih besar disebabkan besarnya laju aliran massa gas CNG, meskipun dengan penambahan gas CNG laju aliran massa minyak solar berkurang. Pada setiap pengaturan *start of injection* dan pengaturan tekanan gas CNG nilai AFR turun sejalan dengan penambahan beban listrik. Hal ini disebabkan karena untuk mengatasi pertambahan beban, mesin harus menghasilkan daya yang besar pula. Daya yang semakin besar ini dihasilkan dari pembakaran bahan bakar yang semakin banyak, dan bahan bakar yang ditambah adalah solar karena penambahan solar diatur oleh sistem governor, akan tetapi, bahan bakar gas CNG dimasukkan secara bervariasi sesuai keluarnya *pressure transducer* 1, 1,5, 2, dan 2,5 bar

Pada tekanan gas CNG 1 bar dan pengaturan *start of injection* (SOI_{gas CNG}) 80° CA BTDC didapat nilai rata-rata AFR tertinggi sebesar 12,90 %, dengan penurunan nilai AFR dibandingkan AFR *single-fuel*. Hal ini disebabkan karena pada setiap tekanan gas CNG yang masuk ke dalam ruang bakar mengakibatkan pengurangan nilai laju alir minyak solar, yang disebabkan oleh peningkatan laju energi yang masuk ke ruang bakar di mana nilai kalor gas CNG lebih besar daripada nilai kalor minyak solar meskipun juga terjadi penurunan nilai laju aliran udara.

E. Substitusi Minyak Solar

Setelah dilakukan pengujian mesin diesel, maka didapatkan grafik substitusi sebagai berikut :



Gambar 9. Grafik Substitusi Solar fungsi Beban dengan SOI_{gas CNG} 80°

Pada gambar 9 memiliki *Trend* yang sama dengan grafik AFR lainnya menunjukkan bahwa jumlah persentase minyak solar yang digantikan oleh gas CNG setiap penambahan beban listrik. Nilai substitusi solar pada grafik tersebut cenderung naik sampai titik maksimum dipembebanan sekitar 1000 – 2000 Watt kemudian bergerak turun seiring dengan beban listrik semakin besar, konsumsi minyak solar semakin banyak untuk menjaga putaran konstan sehingga persentase pergantian semakin kecil.

Pada grafik tersebut terlihat bahwa jumlah persentase penggantian minyak solar rata-rata yang terbesar terjadi pada *start of injection* (SOI_{gas CNG}) 80° CA BTDC dan tekanan gas CNG 1,5 bar, dengan solar tersubstitusi rata-rata sebesar 45,30 %. Akan tetapi, terlihat pada gambar 4.5 b substitusi solar optimal berada pada tekanan 1,5 bar dan *start of injection* (SOI_{gas CNG}) 80° CA dengan nilai 61,39 %. Dapat dikatakan bahwa pengaturan *start of injection* gas CNG tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai substitusi solar, yang lebih berpengaruh adalah tekanan gas CNG yang masuk ke dalam ruang bakar. Dengan meningkatnya tekanan gas CNG, maka besar energi yang masuk ke ruang bakar meningkat, dimana

gas CNG memiliki nilai kalor bahan bakar yang lebih tinggi dibandingkan dengan minyak solar, yaitu: sebesar 47.141 kJ/kg, sedangkan nilai kalor minyak solar sebesar 43,979 kJ/kg. Untuk memproduksi energi dengan putaran stasioner 2000 rpm maka laju energi yang diperlukan dari minyak solar menjadi lebih sedikit.

V. KESIMPULAN

Dari serangkaian pengujian, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dari eksperimen yang dilakukan pada sistem *dual-fuel*, bahwa pengaturan tekanan masuk gas CNG pada *pressurereducer* membuat pengaruh yang lebih signifikan dibandingkan dengan pengaturan *start of injection* gas CNG.
2. Pengaturan yang optimal terjadi pada SOI 80° CA BTDC dengan tekanan gas CNG 1,5 bar dapat mensubstitusi minyak solar rata-rata sebesar 45,30 % dan nilai substitusi minyak solar yang optimal sebesar 61,39 %.
3. Nilai *SFC* minyak solar rata-rata mengalami penurunan Sebesar 47,10 % pada SOI 80° CA BTDC dengan tekanan gas CNG 1,5 bar.
4. Nilai *SFC dual-fuel* rata-rata meningkat sebesar 47,67 % pada SOI 80° CA BTDC dengan tekanan gas CNG 1,5 bar.
5. Efisiensi *thermal* mengalami penurunan sebesar 40,89 % pada SOI 80° CA BTDC dengan tekanan gas CNG 1,5 bar.
6. Temperatur gas buang meningkat dari 292°C menjadi 317°C pada SOI 80° CA BTDC dengan tekanan gas CNG 1,5 bar.
7. Nilai rata-rata AFR mengalami penurunan dari 25,60 $\frac{kg/s}{kg/s}$ menjadi 12,90 $\frac{kg/s}{kg/s}$ pada SOI 80° CA BTDC dengan tekanan gas CNG 1,5 bar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Santoso, A.B. (2013), Karakterisasi Unjuk Kerja Mesin Diesel Generator Set Sistem Dual Fuel Solar dan Biogas dengan Penambahan Fan Udara sebagai Penyuplai Udara, Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya Surabaya.
- [2] Tamam, Zuhri. (2015), Karakterisasi Unjuk Kerja Mesin Diesel Generator Set Sistem Dual Fuel Solar dan Syngas Batubara, Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [3] Kawano, D. Sungkono. (2014), Motor Bakar Torak (Diesel), Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- [4] PT. Pgas Solution, Wilayah Surabaya. (2014), Surabaya.
- [5] Warsita, Aris. (2012), Pengaruh *Injection Timing* dan Prosentase Campuran Minyak Diesel dengan Bahan Bakar Biodiesel terhadap Karateristik Mesin dan Emisi Gas Buang, *TRAKSI*, Vol.12, No.2, hal.1-15.